

ЭПТ 2015



ACED 2015

УДК 621.3:656.56

### 7.3. СИНТЕЗ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ АЛГОРИТМОВ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫХ ПРИВодОВ ГАЗОТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

### SYNTHESIS OF POWER SAVING ALGORITHMS OF VARIABLE FREQUENCY DRIVES OF GAS- TRANSPORT SYSTEMS

**Крюков Олег Викторович**, канд. техн. наук, доцент, главный специалист ОАО «Гипрогазцентр», Россия, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Алексеевская, 26. E-mail: [o.kryukov@ggc.nnov.ru](mailto:o.kryukov@ggc.nnov.ru). Тел.: +7 (831) 428-25-84

**Серебряков Артем Владимирович**, канд. техн. наук, доцент кафедры «Электрооборудование, электропривод и автоматика» НГТУ им. Р.Е. Алексеева, Россия, 603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24. E-mail: [serebryakov@ardman.ru](mailto:serebryakov@ardman.ru). Тел.: +7 (831) 423-10-55

**Хлынин Александр Сергеевич**, инженер-проектировщик ОАО «Гипрогазцентр», Россия, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Алексеевская, 26. E-mail: [a.khlynin@ggc.nnov.ru](mailto:a.khlynin@ggc.nnov.ru). Тел.: +7 (831) 296-46-22

**Oleg V.Kryukov**, Cand.Tech.Sc., senior lecturer, chief specialist of JSC "Giprogazcenter", Russia, 603950, Nizhniy Novgorod, 26, Alekseevskaya str. E-mail: [o.kryukov@ggc.nnov.ru](mailto:o.kryukov@ggc.nnov.ru). Tel.: +7 (831) 428-25-84

**Artem V.Serebryakov**, Cand.Tech.Sc., senior lecturer of the chair «Electric equipment, electric drive and automatics», R.E.Alekseev Nizhegorodsky State Technical University, Russia, 603155, Nizhniy Novgorod, 24, Minina street. E-mail: [serebryakov@ardman.ru](mailto:serebryakov@ardman.ru). Tel.: +7 (831) 423-10-55

**Alexander S.Khlynin**, design engineer of JSC "Giprogazcenter", Russia, 603950, Nizhniy Novgorod, 26, Alekseevskaya str. E-mail: [a.khlynin@ggc.nnov.ru](mailto:a.khlynin@ggc.nnov.ru). Tel.: +7 (831) 296-46-22

**Аннотация:** Предложены принципы, структуры инвариантных систем регулирования и методики получения регрессионных алгоритмов электроприводов основных технологических агрегатов компрессорных станций для эффективного энергосберегающего управления. Представлена комплексная методика исследования различных инвариантных систем с взаимосвязанными объектами газотранспортных систем, базирующаяся на теории планирования эксперимента, с реализацией на этапах модернизации и нового строительства компрессорных станций. Получены результаты анализа практического применения новых агрегатов с электроприводами с энергосберегающими алгоритмами на ряде компрессорных станций газотранспортных систем.

**Abstract:** There offered the principles, structures of invariant systems of regulation and technique of obtaining of regression algorithms of electric drives of compressor stations' basic technological units for effective power saving control. The complex technique of research of various invariant systems with the interconnected objects of gas-transport systems, based on the experimental design theory, with realization at the stages of modernization and new building of compressor stations is presented. There received the results of the analysis of practical application of the new units with electric drives with power saving algorithms on a number of compressor stations of gas-transport systems.

**Ключевые слова:** электропривод; газоперекачивающий агрегат; инвариантная система; энергосбережение; алгоритм.

**Keywords:** electric drive; gas compressor unit; invariant system; power saving; algorithm.

#### ВВЕДЕНИЕ

Оптимальный режим эксплуатации магистральных газопроводов (МГ) заключается в максимальном использовании их пропускной способности (газоперекачки) при минимальных энергозатратах на компримирование, охлаждение и транспортировку [1]. В значительной степени этот режим определяется работой компрессорных станций (КС) и характеризуется неравномерностью

подачи и потребления газа в течение года, месяца, суток, несмотря на наличие газохранилищ, а также научно обоснованных нормативных методик оптимизации [2,3].

Для уменьшения затрат мощности КС на перекачку газа, увеличения пропускной способности газопровода и экономии энергоресурсов выгодно поддерживать макси-

мальное расчетное давление газа в трубопроводе с помощью энергосберегающих алгоритмов частотно-регулируемых электроприводных газоперекачивающих агрегатов [2-4].

#### ЗАМКНУТЫЕ САР ЭГПА ПРИ СТОХАСТИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЯХ

Согласно нормам технологического проектирования МГ ОНТП 51-1-85\* (п.3.116) «В комплексе средств автоматизации КЦ следует предусматривать САР, обеспечивающие поддержание заданных величин давления и температуры газа на выходе станции, устройства антипомпажного регулирования и защиты ЭГПА». Однако существующие средства автоматики в основном работают автономно от агрегатов в ручном режиме, выполняя в основном защитные функции, и не обеспечивают энергоэффективные

режимы. Вместе с тем, сегодня возможности регулируемого электропривода ЭГПА позволяют оптимизировать энергопотребление КС с автоматическим слежением за возмущениями детерминированного и стохастического характера. В [1] предложен способ магистрального транспорта газа, обеспечивающий наивысшую энергоэффективность при любых режимах работы магистральных газопроводов (рис. 1). Это достигается тем, что температура и давление компримированного газа на выходе всех КС в начале каждого линейного участка газопровода измеряются и автоматически регулируются из условия поддержания их на оптимальном уровне в соответствии с заданием и значениями внешних возмущений, действующих на параметры потока газа в газопроводах.

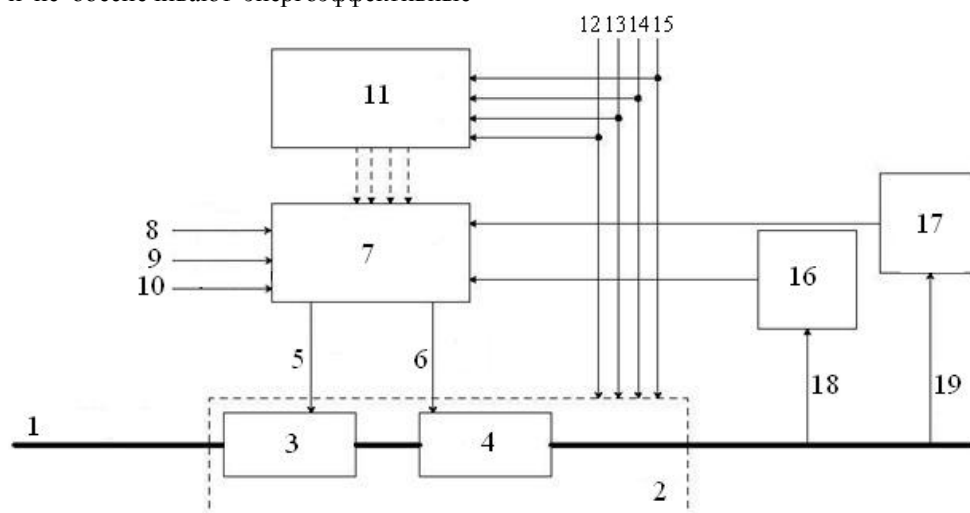


Рис. 1. Структура энергоэффективного транспорта газа через электроприводную КС: 1 - линейная часть МГ, 2 - КС, 3 - ЭГПА, 4 - АВО газа, 5 и 6 - скорости вращения ЭГПА ( $\omega_{\text{зад}}^{\text{ЭГПА}}$ ) и вентиляторов АВО ( $\omega_{\text{зад}}^{\text{АВО}}$ ), 7 - блок расчета параметров регулирования, 8, 9, 10 - заданные значения производительности, давления и температуры газа, 11 - датчики измерения внешних воздействий, 12 - влажность воздуха ( $\beta$ ), 13 - температура воздуха ( $\theta$ ), 14 - перепад температур ( $\Delta t$ ) или давлений на КС ( $\Delta p$ ), 15 - производительность КС ( $Q$ ), 16 и 17 - датчики давления и температуры газа, измеряющих 18 и 19 - реальные значения давления и температуры газа на выходе КС.

Сопоставительный анализ данного способа, заключающегося в формировании давления и температуры потока сжатого газа по всей трассе МГ с помощью ЭГПА и вентиляторов АВО, установленных на всех КС в начале каждого линейного участка МГ, с аналогами показывает, что предлагаемый способ магистрального транспорта газа отличается от известных тем, что в нем автоматически устанавливаются и плавно регулируются величины давления и температуры газа с помощью регулируемых ЭГПА и АВО в зависимости от текущих значений давления и температуры газа в МГ, измеряемых соответственно датчиками давления и температуры газа, заданных параметров давления и температуры участка МГ, а также величин возмущающих воздействий стохастического

характера и, тем самым минимизируются параметрические изменения давления и температуры газопровода, чем повышается его эксплуатационная надежность, а также минимизируются интегральные энергозатраты на привод ЭГПА и вентиляторов АВО газа.

В качестве исходного состояния для оптимизации необходимо выбрать интервалы значений непрерывно изменяющихся переменных и наборы значений дискретных переменных. Причем возможные значения переменных анализируются при постепенном построении дерева, ветви которого соединены с узлами, описывающими рассматриваемые комбинации значений, с использованием технологии разделения переменных, именно разбиения, приводящего к возникновению новых уз-

лов дерева, и оценки, именно определения с большой вероятностью ветвей дерева, которые могут привести к листьям, соответствующим конечному оптимизированному решению. Таким образом, в приоритетном порядке проходят ветви с наибольшей вероятностью успешного решения, причем искомые величины рассматривают как оптимальные, если заранее определенные ограничения не нарушаются или нарушаются в минимальной степени. При этом достигается минимум целевой функции, которая имеет следующий трехфакторный вид:

$$G = \alpha \cdot R + \beta \cdot W + \gamma \cdot C,$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  - весовые коэффициенты,  $R$  - фактор «режима», т.е. минимизации (максимизации) давления в определенных точках ГТС, таких как любые точки, расположенные выше и ниже КС или регулирующего вентиля, а также устройства потребления газа,  $W$  - фактор «энергии» или минимизации потребления электроэнергии на компримирование газа и его охлаждение в АВО перед подачей в газопровод,  $C$  - фактор «цели», т.е. максимизации (минимизации) расхода газа на участке системы, расположенном между двумя точками газопровода, или давления в определенной точке соединения.

Причем указанные ограничения включают в себя ограничения равенства, в число которых входят закон потери напора в трубопроводах и первое правило Кирхгофа, определяющие расчеты сетей, и ограничения неравенства, в число которых входят ограничения на минимальные и максимальные значения расхода газа, ограничения на минимальное и максимальное давление в активных или пассивных объектах и ограничения мощности ЭГПА КС.

Для реализации данной энергоэффективной технологической схемы система электропривода ЭГПА должна быть частотно-регулируемой и инвариантной ко всем параметрам возмущениям детерминированного и стохастического характера, т.е. комбинированной САР (по отклонению и возмущению) с отрицательной обратной связью по главному технологическому параметру – давлению газа на выходе КС. Такая система [1,4], показана на рис. 2.

Объектом управления для электропривода 9 является газоперекачивающий агрегат 10, на вход которого подводится газ. Повышение давления (компримирование) газа происходит за счет политропной работы компрессоров ГПА. Вращение газоперекачивающего агрегата 10 обеспечивает двигатель 9 с устройством изменения его частоты вращения (ПЧ) с законом управления  $U/f^2 = \text{const}$ . На вход блока 3 расчета необходимой скорости вращения поступают

сигналы о величине возмущающих воздействий с датчиков 2 измерения внешних воздействий 1 и сигнал задания давления 5, который корректируется с датчика давления 11.

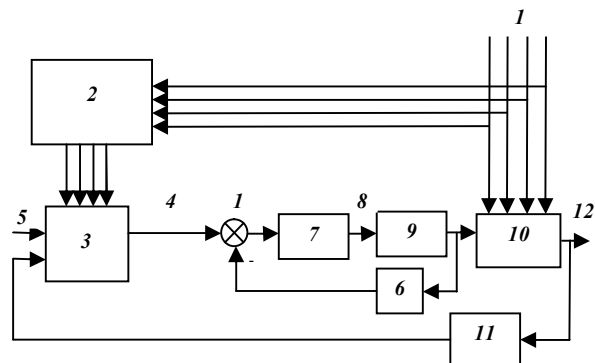


Рис. 2. Структура инвариантной системы ЭГПА.

Динамические колебания скорости вращения электропривода ГПА 9 поступают на датчик скорости вращения 6 и далее на второй вход сумматора 13. Сигнал 4 с выхода блока 3 расчета необходимой скорости вращения электропривода ГПА поступает на сумматор 13, где корректируется сигналом с датчика скорости 6. Сигнал с сумматора 13 поступает на ПИ-регулятор 7, на выходе которого формируется сигнал 8, пропорциональный требуемой скорости вращения электропривода 9. Газоперекачивающий агрегат 10, вращаемый электроприводом 9, создает требуемое давление газа на выходе компрессорной станции 12.

#### ВОЗМОЖНОСТИ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ АЛГОРИТМОВ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ЭГПА

В последние годы произошла масштабная революция технических и алгоритмических возможностей электроприводов ЭГПА (рис.3) на основе развития силовой электроники, электромашиностроения и микропроцессорной техники. Это позволяет стать агрегатам гибкими для решения широкого спектра технологических задач при минимуме строительных, капитальных и эксплуатационных затрат.



Рис. 3. Современный моноблок ЭГПА.

Использование современных ЭГПА с энергосберегающими алгоритмами имеет только внешние риски, связанные с зависимостью от системы электроснабжения. На экономическую целесообразность использования ЭГПА оказывают влияние расходы на подключение к энергосистеме, как часть капитальных затрат, а также тариф на электроэнергию в регионе, как основная часть эксплуатационных расходов.

Оценка этих рисков является важнейшей составляющей риск-анализа проектов реконструкции и нового строительства электроприводных КС и должна осуществляться на предынвестиционной стадии с учетом

прогнозных значений по развитию энергосистемы региона и динамике тарифов на электроэнергию. Подобные расчеты для существующих и вновь строящихся магистральных газопроводов проведены и представлены в [3,4].

Анализ указанных выше рисков позволяет выделить районы, в которых использование электроприводных КС является наиболее оправданным, они выделены темным цветом на рис. 4. В России к таким регионам можно отнести территории Урала, Западной Сибири и юга Восточной Сибири с дешевой гидрогенерацией и избыточными электрическими мощностями.

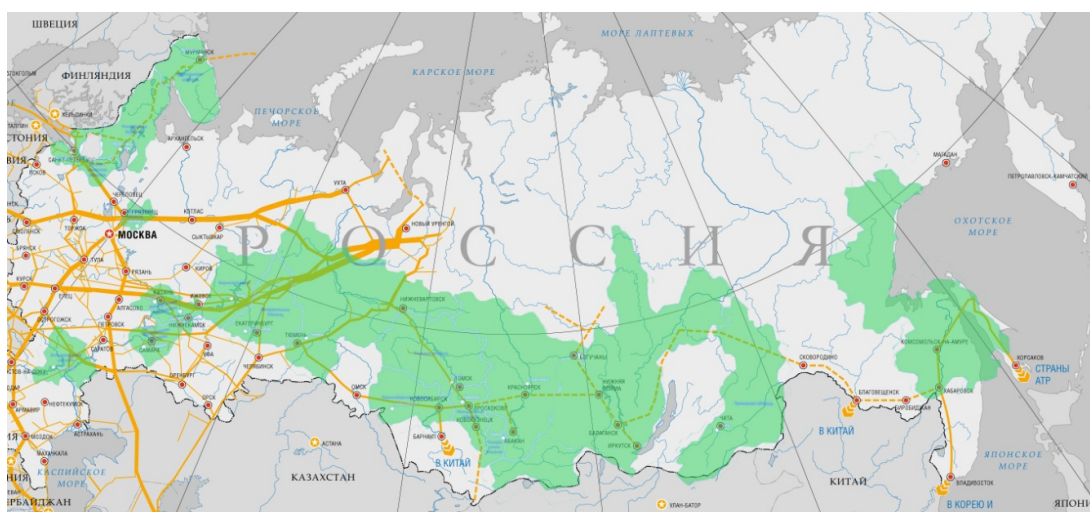


Рис. 4. Наиболее благоприятные регионы России для использования ЭГПА

В качестве примера ниже приведено технико-экономическое сравнения по выбору типа ГПА для компрессорной станции КС-1 перспективного магистрального газопровода «Иркутск-Проскоково». Иркутская энергосистема является одной из крупнейших в России. Она занимает первое место в Сибири по производству электрической и тепловой энергии. Район размещения КС-1 характеризуется крупными генерирующими источниками: Иркутская ГЭС (662,4 МВт), Иркутские ТЭЦ (796 МВт) и развитая сеть ЛЭП-110 кВ. Рассматривались 2 варианта оснащения КС-1: 4 газотурбинных агрегата ГПА-16 «Урал» мощностью 16 МВт или 5 ЭГПА-12,5. Регион имеет благоприятные тарифы на электроэнергию с реализацией программ по усилению надежности электроснабжения. До 2020 года будет введено 3600 МВт новых мощностей.

Анализ показал высокую чувствительность результатов сравнения типов приводов ГПА от относительной стоимости электрической энергии и газа. Даже при незначительном изменении этого соотношения результаты могут получиться диаметрально противоположными. Это говорит о необходимости очень тщательной оценки

динамики изменения цен на энергоресурсы при вариантах технико-экономического обоснования.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Электроприводы объектов газотранспортных систем / Под ред. О.В. Крюкова. Н.Новгород: Исток, в 6 тт., том 4, 2013. – 300с.
2. Крюков О.В. Стратегии инвариантных систем управления электроприводами объектов ОАО «Газпром» // Труды X МНТК «Идентификация систем и задачи управления (SICPRO'15)». М.: ИПУ РАН им. В.А. Трапезникова. – 26-29 января 2015. – С.368-386.
3. Крюков О.В., Хлынин А.С. Техно-экономическое обоснование применения современных ЭГПА на объектах транспорта газа ОАО «Газпром» // Компрессорная техника и пневматика, 2015, №1. – С.2-7.
4. Хлынин А.С., Крюков О.В. Техно-экономические аспекты применения ЭГПА на компрессорных станциях газопроводов // XVI МНТК по компрессоростроению, 23-25 сентября 2014, Том 1. СПб: РЭПХ, 2014. – С.399-409.